

模拟电商物流环境下纳米保鲜袋对香菇贮运品质的影响

刘娅妮^{1,2}, 孙鹏伟^{2,3}, 高虹^{2,4}, 范秀芝^{2,4}, 殷朝敏^{2,4},
吴迪⁵, 史德芳^{2,4*}, 方尚玲¹

(1. 湖北工业大学生命科学与健康学院, 武汉 430068; 2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 国家食用菌加工技术研发分中心, 林下经济湖北省工程研究中心, 武汉 430064; 3. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 4. 湖北省香菇产业技术研究院, 随州 441300, 5. 武汉淘小菇农业科技公司, 武汉 430064)

摘要: **目的** 探究模拟电商物流环境下纳米保鲜袋对香菇贮运品质的影响。**方法** 以香菇‘808’为实验材料, 通过测定失重率、色度、硬度、呼吸速率、可溶性固形物、相对电导率、可溶性蛋白、还原糖、抗坏血酸、总酚、类黄酮等一系列贮运品质指标, 考察不同包装(泡沫箱+普通PE保鲜袋、泡沫箱+纳米保鲜袋)对新鲜香菇的保鲜效果。**结果** 泡沫箱+纳米保鲜袋可有效延缓香菇贮运期间失重率、可溶性固形物、硬度和相对电导率的下降, 防止鲜香菇色泽劣变, 抑制香菇呼吸强度上升, 阻滞膜脂过氧化发生; 同时, 相比对照组, 纳米组能够有效保持可溶性蛋白、还原糖和抗坏血酸含量, 维持较高的总酚和类黄酮水平。贮运末期(第5 d), 泡沫箱+纳米保鲜袋处理的香菇失重率、呼吸强度、相对电导率分别为1.71%、232.20 mg/(kg·h)、28.68%, 均低于对照组; 而 L^* (64.60)、硬度(9558.32 g)、可溶性固形物(3.19%)、可溶性蛋白(1.25 mg/g)、还原糖(0.77 mg/g)、总酚(16.51 mg/100 g)、类黄酮(53.61 mg/100 g)均高于对照组。**结论** 泡沫箱+纳米保鲜袋能够有效抑制模拟电商物流过程中香菇的品质劣变, 降低营养价值的损失, 提高贮运品质, 延长货架期。本研究可为模拟电商物流包装新鲜香菇的应用提供技术支持。

关键词: 香菇; 模拟电商物流环境; 纳米包装; 贮运品质

Effects of nano fresh-keeping bags on storage and transportation quality of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

LIU Ya-Ni^{1,2}, SUN Peng-Wei^{2,3}, GAO Hong^{2,4}, FAN Xiu-Zhi^{2,4}, YIN Chao-Min^{2,4},
WU Di⁵, SHI De-Fang^{2,4*}, FANG Shang-Ling¹

(1. School of Life Science and Health Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, National Research and Development Center for Edible Fungi Processing, Hubei Provincial Engineering Research Center of Under-forest Economy, Wuhan 430064, China; 3. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 4. Hubei Xianggu Mushroom Industrial Technology Research Institute, Suizhou 441300, China; 5. Wuhan Taoxiaogu Agricultural Technology Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

基金项目: 湖北省重点研发技术项目(2022BBA0024、2023BBB138)、湖北省食用菌产业技术体系专项资金资助项目(20230HBSTX4-09)、湖北省农业科学院领军人才计划项目(2023-2028)

Fund: Supported by the Key Research and Development Projects in Hubei Province (2022BBA0024、2023BBB138), the Hubei Edible Mushroom Industry Technology System Special Funds Funding (20230HBSTX4-09), and the Leading Talents Program of Hubei Academy of Agricultural Sciences (2023-2028)

*通信作者: 史德芳, 博士, 研究员, 主要研究方向为食(药)用菌功能食品开发。E-mail: shidefang@hbaas.com.

*Corresponding author: SHI De-Fang, Ph.D, Professor, Research Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China. E-mail: shidefang@hbaas.com

ABSTRACT: Objective To explore the effects of nano fresh-keeping bags on the storage and transportation quality of fresh *Lentinula edodes* in a simulated E-commerce logistics environment. **Methods** With *Lentinula edodes* '808' as the experimental material in this study. A series of storage and transportation quality indexes such as weight loss rate, color, hardness, respiration rate, soluble solids, relative conductivity, soluble protein, reducing sugar, ascorbic acid, total phenol, and flavonoids were measured to investigate the fresh-keeping effect of different packaging (foam box and ordinary PE fresh-keeping bag, foam box and nano fresh-keeping bag) on fresh *Lentinula edodes*. **Results** The results showed that the foam box and nano-preservative bag could effectively delay the decrease of weight loss rate, total soluble solid, hardness, and relative conductivity of *Lentinula edodes* during storage and transportation, prevent the color deterioration of fresh *Lentinula edodes*, inhibit the increase of respiration intensity of *Lentinula edodes*, and block the occurrence of membrane lipid peroxidation. At the same time, compared with the control group, the nano-group could effectively maintain the content of soluble protein, reduce sugar, and ascorbic acid, and maintain a higher level of total phenols and flavonoids. At the end of storage and transportation (5th day), the weight loss rate, respiratory intensity, and relative conductivity of *Lentinula edodes* in the foam box and nano fresh-keeping bag were 1.71%, 232.20 mg/(kg·h), and 28.68%, respectively, which were lower than those of the control group. The L^* (64.6), hardness (9558.32 g), soluble solids (3.19 mg/g), soluble protein (1.25 mg/g), reducing sugar (0.77 mg/g), total phenols (16.51 mg/100 g), and flavonoids (53.61 mg/100 g) were higher than the control group. **Conclusion** The foam box and nano fresh-keeping bag can effectively inhibit the quality deterioration of *Lentinula edodes* during simulated E-commerce logistics, reduce the loss of nutritional value, improve the quality of storage and transportation, and extend the shelf life. This study can provide technical support for applying simulated E-commerce logistics packaging of fresh *Lentinula edodes*.

KEY WORDS: *Lentinula edodes*; simulate E-commerce logistics environment; nano fresh-keeping bags; storage quality

0 引言

香菇(*Lentinula edodes*)又称冬菇、花菇,是担子菌纲、伞菌目、口蘑科、香菇属真菌,是世界上第二大食用菌,我国香菇产量位居世界前列^[1]。与干菇相比,新鲜香菇口感滑嫩、风味自然,素有“菇中皇后”之称,更适合消费者需求。近年来,国内外对新鲜香菇的需求与日俱增,香菇已经成为我国的重要出口商品之一^[2]。但新鲜香菇含水量高、缺乏表皮保护,在采后的贮运过程中极易出现失重、开伞及褐变等现象,存在品质损失严重、贮运效益不高等问题^[3],导致常温下新鲜香菇的货架期只有2~3 d^[4]。随着我国香菇种植面积的扩张和产量的飞速增长,如何提高鲜销香菇的贮运品质,成为制约香菇产业持续发展的瓶颈。

随着“互联网+”现代农业的兴起和物流技术的飞速发展,我国淘宝、京东、美团等电子商务平台也在蓬勃发展^[5]。在新冠肺炎疫情期间,电商平台凭借其便利性和非接触性,增加了消费者的购买率^[6]。目前,香菇的贮运多采用产地集中包装(采用规格为20 kg或25 kg的塑料框),通过公路运输至全国各地。据中国食用菌协会统计,2021年我国香菇产量达到1295.6万t,占食用菌总产量的31.3%,产值超过1千亿元^[2]。因此,如何在长途运输和销售中保持香菇的新鲜度,已成为香菇产业迫切需要解决的问题。

近年来,生鲜农产品最常见的短途贮运为采后预冷、泡沫箱加冰包装等^[7]。不同贮藏容器和包装材料是影响果蔬采后贮运品质优劣及货架期长短的重要因素。YU等^[8]研究发现,聚乙烯膜能延缓杏鲍菇木质化,维持杏鲍菇的贮运品质。XU等^[9]研究表明1-甲基环丙烯结合纳米包装能有效延长杏鲍菇的保质期。ZHAO等^[10]利用转录组学分析了纳米包装对延缓金针菇采后菌柄伸长的机制,证明了纳米包装能提升金针菇贮运品质。ZHU等^[11]以负载柠檬醛的聚乳酸和介孔二氧化硅为基材制备的纳米包装材料能有效维持变绿红菇的营养品质,延长保质期。因此,为维持物流运输过程新鲜香菇的商品和食用价值,研究香菇模拟电商物流具有重要的现实意义。

YE等^[12]前期研究表明,纳米包装能较好维持新鲜大球盖菇采后的贮运品质。但目前鲜少有将纳米包装材料应用于香菇贮运品质的研究中。鉴于此,本研究选用课题组自主研发的纳米包装材料,通过模拟香菇在电商物流贮运过程中温度的变化,考察其理化指标、营养指标和抗氧化指标的变化,以为香菇采后包装贮运过程提供理论参考,为促进香菇产业的持续发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜香菇(*Lentinula edodes*)‘808’采购于武汉市白沙

洲农贸市场, 采购后 2 h 内运至实验室进行处理; 泡沫箱(湖南省合子包装材料有限公司); 聚乙烯保鲜袋(polyethylene fresh-keeping bags, 北京华正龙泰科技有限公司); 纳米保鲜袋(实验室自制)。

牛血清白蛋白、2,6-二氯酚钠盐、没食子酸、芦丁、硝酸铝(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 考马斯亮蓝 G-250(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(分析纯, 上海源叶生物有限公司); 葡萄糖、无水乙醇、碳酸钠、氢氧化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

BSC-250 恒温恒湿箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); E300-2 精密电子天平(感量 0.1 mg, 常熟双杰测试仪器厂); CR-400 色彩色差计(日本 Konica Minolta 公司); FD5-2.5 型真空冷冻干燥机(美国 Goldsim 公司); TA.XT 2i/20 型质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); JFQ-315H 果蔬呼吸测定仪(北京均方理化科技研究所); DDS-307A 型电导率仪(雷磁上海仪电科学仪器股份有限公司); WYT-4 手持折光仪(上海精密仪器仪表有限公司); UV-1800 紫外可见分光光度计(日本岛津有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 纳米保鲜袋的制备

纳米保鲜袋包括基膜及覆盖于基膜表面的活性膜两部分。其中, 基膜包括质量百分比为 70%~80% 的聚乙烯、5%~10% 的纳米碳酸钙、0.1%~3% 的分散剂、4%~8% 的抗菌剂、3%~6% 的聚乙烯吡咯烷酮、2%~5% 的聚异丁烯; 活性膜由质量比为 10~16:5~8:2~4 的聚乙烯醇、正硅酸乙酯和海藻酸钠制备。将基膜材料混合均匀造粒、吹塑得到基膜后, 将其浸渍在活性液中, 干燥得到纳米薄膜^[13]。

1.3.2 样品分组及预处理

香菇运输至实验室后, 挑选个体大小均一, 无机械损伤, 无畸形和病虫害, 成熟度相近的香菇, 去除菇柄后, 随机分成 2 组。

①对照组: 泡沫箱+聚乙烯保鲜袋包装处理;

②纳米组: 泡沫箱+纳米保鲜袋包装处理。

通过对京东、顺丰、朴朴、美团电商冷链物流贮运实际运行状况以及所使用贮运材料的充分了解和认识, 发现终端配送环节贮运条件对生鲜菌菇类产品的品质影响较大, 据此本研究设计的贮运条件(样品统一放入尺寸 285 mm×165 mm×180 mm, 厚度为 17 mm 的泡沫箱, 每组加入两个冰袋, 单个冰袋质量约为 200 g, 如图 1 所示)最大程度的实现对鲜香菇贮运环境的模拟。结合课题组前期调研结果发现, 本研究所使用的泡沫箱内温度变化曲线如图 2 所示, 模拟气温条件为 4~26℃。香菇预冷结束进入模拟电商物流过程后, 泡沫保温箱升温较快, 模拟 2 d 后泡沫箱内温度

在 15℃ 上下浮动。每组泡沫箱, 用于模拟电商物流过程中泡沫箱内部温度变化。每组实验重复 3 次, 每 24 h 随机取样进行指标测定, 结果取平均值。

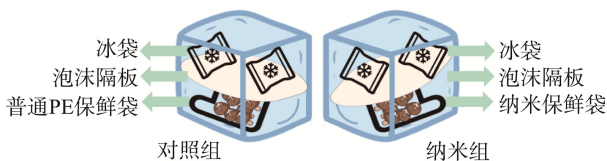
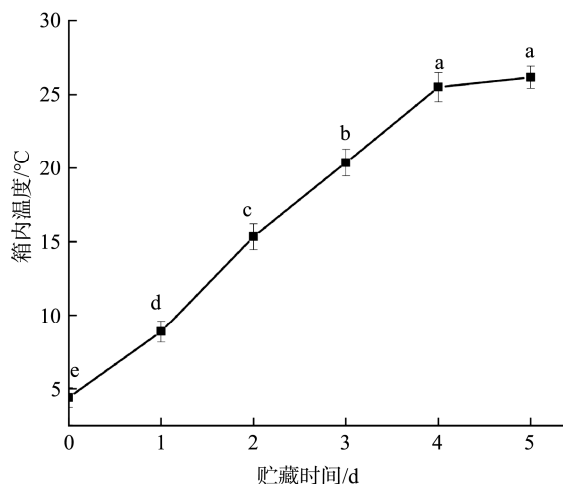


图 1 模拟电商物流环境下包装方式

Fig.1 Packaging methods under the condition of simulate E-commerce logistics environment



注: 不同小写字母表示同一处理组在不同贮藏时间点的显著性差异($P < 0.05$)。

图 2 泡沫箱内部温度变化

Fig.2 Temperature changes inside the foam box

1.3.3 失重率

用称重法测定失重率, 每 24 h 测定 1 次。失重率计算如公式(1):

$$A\% = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A : 失重率, %; M_0 : 样品初始质量, g; M_1 : 样品贮藏当天测定质量, g。

1.3.4 色度测定

参照叶爽等^[14]的方法稍作修改, 用色差仪检测香菇菇盖正中点颜色, 用 CIELab 表色系表示, L^* 表示亮度, a^* 表示红绿度, b^* 表示黄蓝度。每次测定均在同一光源条件下, 每组测定 3 次平行。

1.3.5 硬度测定

参考叶爽等^[14]的方法稍作修改, 采用 TA.XT Plus 质构仪中的 P/36 R 圆柱型探头, 测试条件如下: 测前、测后速率 5.0 mm/s、测试速率 1.0 mm/s, 触发力 6 g, 目标模式为形变 40%。每组样品测定 6 次, 结果取平均值, 单位为 g。

1.3.6 呼吸速率测定

参考 WANG 等^[15]的方法稍作修改,采用 JFQ-315H 果蔬呼吸测定仪进行测定。每次随机取 3 个香菇,称重后置于 4.4 L 密封罐内,每 30 min 记录 1 次罐中 CO₂ 浓度,测定 3 次。每组样品重复 3 次,取平均值。呼吸速率计算如公式(2):

$$Q = \frac{F \times 60 \times \varphi}{22.4} \times \frac{4.4}{W} \times 10^{-6} \times \frac{273}{273 + T} \quad (2)$$

式中: Q : 呼吸强度, CO₂ mg/(kg·h); F : 气体流速, mL/min; φ : CO₂ 体积分数, $\mu\text{L/L}$; W : 样品质量, kg; T : 测定温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.7 可溶性固形物含量测定

称取 5 g 香菇样品,在研钵中研碎过滤后,静置 30 min,取上清液测定其可溶性固形物含量。

1.3.8 细胞膜渗透率测定

参照姜宏志等^[16]的方法并稍作改进。将香菇菌盖中间部分切成均匀大小(约 2 g),加入 25 mL 蒸馏水后立即测定其电导率,记为 P_0 ;室温静止 30 min 后测定其电导率,记为 P_1 ;沸水浴 15 min,冷却至室温再次测定其电导率,记为 P_2 。相对电导率 P 计算如公式(3):

$$P/\% = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P : 相对电导率, %; P_0 : 空白蒸馏水的电导率, %; P_1 : 初始样品液的电导率, %; P_2 : 沸水浴冷却后测定样品液的电导率, %。

1.3.9 营养指标测定

可溶性蛋白质含量的测定参考李艳杰等^[17]的方法,以牛血清白蛋白为标准品绘制标准曲线,计算样品中蛋白质含量,单位为 mg/g。标准曲线方程为: $Y_1 = 0.0054X_1 + 0.0051$, $r^2 = 0.9977$ 。

还原糖含量的测定参考 JIN 等^[18]的方法,以葡萄糖为标准品绘制标准曲线,单位为 mg/g。标准曲线方程为: $Y_2 = 1.2059X_2 - 0.0238$, $r^2 = 0.9988$ 。

抗坏血酸含量采用 2,6-二氯酚酞滴定法测定^[19],根据消耗样品溶液的体积来计算香菇中抗坏血酸的含量,单位为 mg/100 g。

1.3.10 总酚和类黄酮含量测定

总酚含量测定参考 CHEN 等^[20]的方法并稍作修改。以没食子酸为标准品绘制标准曲线,单位为 mg/100 g。标准曲线方程为: $Y_3 = 0.0135X_3 + 0.0621$, $r^2 = 0.9951$ 。

类黄酮含量测定参考翟梦杰等^[21]的方法。以芦丁为标准品绘制标准曲线,单位为 mg/100 g。标准曲线方程为: $Y_4 = 0.4812X_4 - 0.0021$, $r^2 = 0.9979$ 。

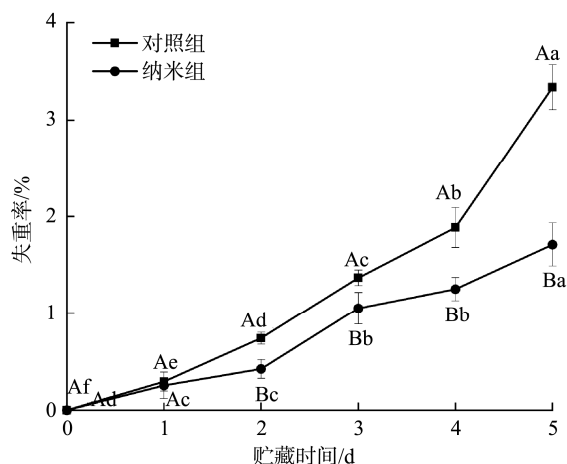
1.4 数据处理

每组处理均进行 3 次或以上重复测定,采用 Excel 2016 软件进行数据处理,结果以“平均值 \pm 标准偏差”表示,采用 SPSS Statistics 21 软件进行显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著,采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 香菇失重率的变化

失重率是评价香菇品质的关键指标之一,由于贮藏条件的影响,香菇会发生一系列生理生化反应,导致其水分散失、质量减少,影响香菇的品质,限制其市场寿命^[22]。由图 3 可以看出,香菇的失重率在贮运过程中呈上升趋势,贮运 2 d 后,对照组失重率显著高于纳米组($P < 0.05$)。贮运 5 d,对照组和纳米组的失重率分别为 3.34% 和 1.71%,说明纳米保鲜袋能较好地延缓香菇采后失重,此结果与 FANG 等^[23]在聚乙烯中加入不同纳米粒子(如纳米 Ag、纳米 TiO₂、凹凸棒、纳米 SiO₂ 等)制备的纳米保鲜袋贮藏双孢蘑菇的结果相似。与对照组相比,纳米组整个贮运期间失重率始终低于 2.00%,这可能是由于本研究采用的纳米包装袋的气体透过率以及水蒸气透过率较高,使得香菇在贮藏期间进行的蒸腾作用及呼吸代谢产生的气体可以较好地与外界气体环境进行交换,而食用菌和周围环境之间的低蒸汽压差有利于其贮藏^[24];另一方面,纳米颗粒的加入可能会吸收食用菌释放的乙烯,而乙烯往往引起呼吸代谢加速,促进衰老^[25]。另外,良好的透气透水性能够减少香菇在包装袋中产生的水气,降低香菇的腐烂速度。虽然贮运后期(2~5 d)对照组失重率显著高于纳米组($P < 0.05$),但两组香菇的失重率仍在市场可接受范围内(5%~10%)^[26]。



注:图中不同小写字母表示同一处理组在不同贮藏时间点的显著性差异($P < 0.05$),不同大写字母表示不同处理组在同一贮藏时间点的显著性差异($P < 0.05$),下同。

图3 不同包装对香菇模拟电商物流环境下失重率的影响
Fig.3 Effects of different packaging on the weight loss rate of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

2.2 香菇色度的变化

色度作为食品重要的外观指标,其深浅与品质有直接关系,因此可以通过测定香菇的色度判别色泽劣变情况。如表 1 所示,对照组和纳米组香菇在贮运过程中 L^* 、

表 1 香菇在贮藏过程中色度的变化
Table 1 Changes in *Lentinus edodes* color during storage

贮藏时间/d	对照组			纳米组		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
0	69.83±0.67 ^{Aa}	8.37±0.12 ^{Ab}	23.63±0.32 ^{Ad}	69.83±0.67 ^{Aa}	8.37±0.12 ^{Ab}	23.63±0.32 ^{Ac}
1	65.83±0.31 ^{Bb}	9.63±0.25 ^{Aa}	22.73±0.31 ^{Bc}	67.43±0.45 ^{Ab}	9.03±0.51 ^{Aa}	21.37±0.72 ^{Af}
2	64.53±0.78 ^{Bc}	8.00±0.72 ^{Ab}	23.87±0.38 ^{Ad}	66.37±0.46 ^{Ac}	7.87±0.06 ^{Ab}	24.57±0.38 ^{Ad}
3	62.97±0.55 ^{Bd}	6.93±0.15 ^{Ac}	26.27±0.95 ^{Ac}	65.60±0.10 ^{Ad}	7.07±0.23 ^{Ac}	26.10±0.17 ^{Ac}
4	61.37±0.61 ^{Bc}	6.00±0.36 ^{Ad}	27.23±0.40 ^{Ab}	65.37±0.15 ^{Ad}	6.53±0.15 ^{Ac}	29.03±0.15 ^{Ab}
5	59.13±0.90 ^{Bf}	4.37±0.25 ^{Bc}	29.47±0.15 ^{Aa}	64.60±0.46 ^{Ac}	5.93±0.47 ^{Ad}	31.87±0.55 ^{Aa}

注:表中不同小写字母表示同一处理组在不同贮藏时间点的显著性差异($P<0.05$),不同大写字母表示不同处理组在同一贮藏时间点的显著性差异($P<0.05$)。

a^* 、 b^* 存在显著差异($P<0.05$)。在整个贮运过程中,纳米组 L^* 由 69.83 下降至 64.60,而对照组 L^* 由 69.83 下降至 59.13,两组香菇 L^* 均呈下降趋势,且纳米组香菇 L^* 始终大于对照组,这可能与香菇采后代谢活跃,发生酶促褐变有关^[15,22]。对照组和纳米组香菇 a^* 在贮运期间均呈先上升后下降趋势,且贮运期间,对照组香菇 a^* 下降较快,贮运末期,纳米组香菇 a^* 显著高于对照组($P<0.05$)。纳米组和对照组香菇 b^* 整体呈现上升趋势,贮运 1 d,两组 b^* 区别显著($P<0.05$)。综上,纳米包装在一定程度上抑制了新鲜香菇的颜色劣变,尤其对 L^* 影响明显,能较好地维持香菇的亮度。此外,本研究中,香菇在贮运期间由于呼吸作用导致细胞降解代谢发生褐变等反应^[11],且香菇自身的营养物质有利于微生物的生长繁殖,引起造成色素大量积累,出现组织塌陷、黑斑等现象。

2.3 香菇硬度的变化

硬度是香菇质构属性中最重要的指标^[14]。如图 4 所示,随着贮运时间的延长,两组香菇硬度均呈下降趋势,且对照组香菇硬度下降幅度始终大于纳米组。贮运 2 d,纳米组与对照组的硬度分别为 11554.98 g 和 10718.93 g,两组差异显著($P<0.05$)。贮运前期(0~2 d),两组香菇硬度下降较缓,可能在于前期冰袋未融化,泡沫箱内处于低温状态,对维持香菇硬度具有正面影响。贮运 2 d 后,香菇硬度下降幅度大,可能是因为泡沫箱内部温度升高,加速了香菇细胞壁降解,导致组织细胞失水严重,使得香菇内水分及营养物质迅速消耗,进而影响其硬度^[27]。贮运 5 d,对照组和纳米组的香菇硬度分别为 7873.08 g 和 9558.32 g,降为初始值的 62.84%和 75.33%,这表明纳米组能有效抑制香菇硬度的下降。肖徐等^[28]对比不同包装发现,泡沫箱能抑制黄瓜的呼吸作用,延缓黄瓜内总酚等营养物质的损耗,达到维持硬度的效果。WANG 等^[15]发现臭氧熏蒸结合纳米包装材料处理能较好的维持双孢蘑菇的硬度。综上所述,纳米保鲜袋处理更有利于延缓香菇硬度的下降,保持在贮运期间子实体较好的质地品质。

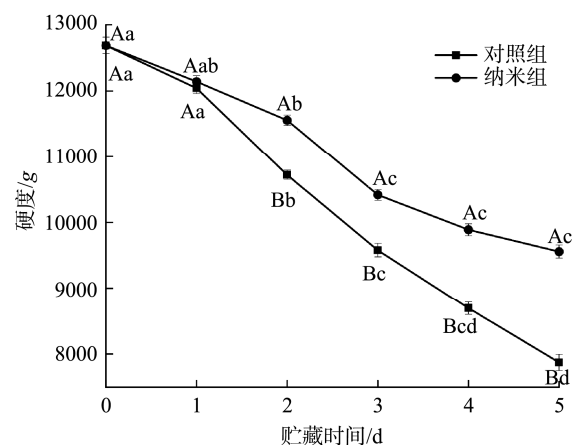


图 4 不同包装对香菇模拟电商物流环境下硬度的影响

Fig.4 Effects of different packaging on the hardness of *Lentinus edodes* under simulated E-commerce logistics environment

2.4 香菇呼吸强度的变化

呼吸强度是衡量香菇组织内新陈代谢速率的一个重要指标,呼吸强度越高,其耐贮藏性越差^[15]。由图 5 可知,在整个贮运期间,香菇呼吸强度在两组间整体变化趋势一致,均呈现先升后降的趋势,其他研究者也有相似结果^[29-30]。贮运前期(0~2 d)呼吸强度上升,这是由于香菇在采后依旧保持旺盛的生理活动;贮运 2 d,对照组和纳米组的呼吸强度分别为 413.54 mg/(kg·h)、370.91 mg/(kg·h),均出现呼吸峰值,这表明香菇进入成熟阶段,此时香菇贮运品质达到最佳;在此之后,香菇呼吸强度下降,直至贮运期结束。整个贮运过程中,对照组的呼吸强度始终显著高于纳米组($P<0.05$)。贮运 5 d,纳米组香菇呼吸强度最低,仅为 232.20 mg/(kg·h),相较于对照组,纳米组的呼吸强度降低了 20%。CAI 等^[31]的研究结果表明,对照组(无包装处理双孢蘑菇)的呼吸峰在第 3 d 出现,峰值为 429.9 mg/(kg·h),其余各组均在第 6 d 出现,负载纳米 SiO₂、纳米 TiO₂ 的聚乙烯醇材料可以调控包装内部的气体组成,减少气体交换,延缓呼吸峰的出现,这一变化与本研究相近,也进一步说明了纳米包装材料能有效抑制新鲜香菇贮运期间的呼吸速率。

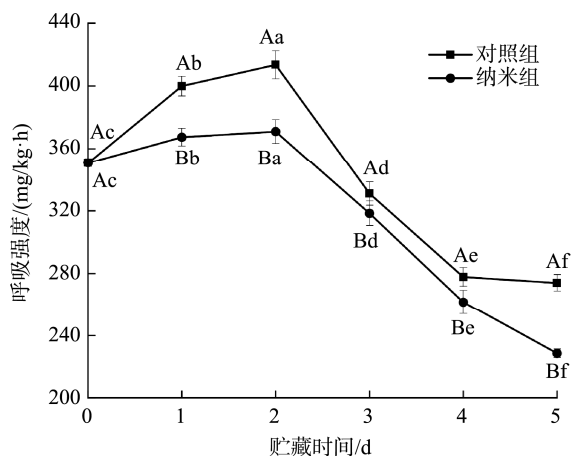


图5 不同包装对香菇模拟电商物流环境下呼吸强度的影响
Fig.5 Effects of different packaging on the respiratory intensity of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

2.5 香菇可溶性固形物的变化

可溶性固形物是影响香菇风味的主要因素之一,香菇子实体的衰老是导致贮藏过程中可溶性固形物含量下降的关键因素^[16]。如图6所示,香菇初始的可溶性固形物含量为6.09%,在整个贮运过程中,两组新鲜香菇的可溶性固形物含量呈现下降趋势。在贮运第1d,两组香菇可溶性固形物含量差异不显著($P>0.05$),对照组和纳米组分别为5.20%和6.09%。贮运3d,对照组和纳米组的可溶性固形物分别下降了2.30%、1.33%。贮运5d,对照组可溶性固形物含量为2.89%,显著低于纳米组(3.19%) ($P<0.05$),这可能是因为呼吸作用将可溶性固形物(主要是糖类)转化为能量^[23]。

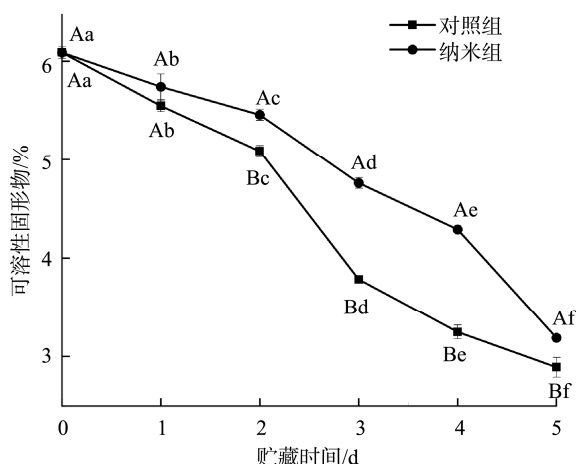


图6 不同包装对香菇模拟电商物流环境下可溶性固形物的影响
Fig.6 Effects of different packaging on the total soluble solid of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

2.6 香菇相对电导率的变化

新鲜香菇缺乏表皮保护,易受外界因素而引起组织

变软,细胞膜相对电导率的高低影响香菇品质,是评价香菇细胞膜的完整性和损伤程度的重要指标^[21]。由图7可以看出,相对电导率呈上升趋势,纳米组相对电导率显著低于对照组($P<0.05$)。贮运2d与0d相比,对照组和纳米组的相对电导率分别上升了7.80%、3.47%,纳米组相对电导率上升较为缓慢,原因是贮运过程中对照组呼吸强度始终高于纳米组,香菇生命活动强,膜脂氧化速度加快,细胞膜通透性增加^[30]。贮运2d后,两组香菇相对电导率上升较快,原因可能是泡沫箱内部环境温度升高,香菇细胞膜系统遭到破坏,细胞内容物渗出^[27]。贮运5d,对照组与纳米组的相对电导率分别为36.29%、28.68%,说明泡沫箱结合纳米保鲜袋处理对抑制香菇相对电导率的升高具有显著效果,这与MA等^[32]采用纳米包装贮藏双孢蘑菇的结果类似。

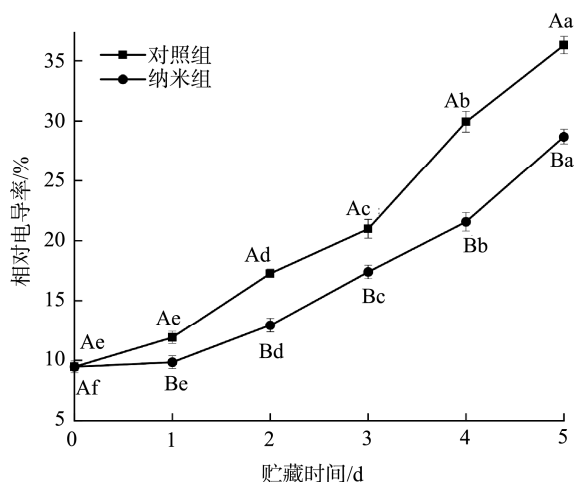


图7 不同包装对香菇模拟电商物流环境下相对电导率的影响
Fig.7 Effects of different packaging on the relative conductivity of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

2.7 香菇营养指标的变化

香菇在贮运过程中,蛋白质会在蛋白酶的作用下分解产生氨基酸和多肽,同时释放能量^[18]。由图8(a)可知,可溶性蛋白含量呈现下降趋势,其中,对照组可溶性蛋白含量显著低于纳米组($P<0.05$)。YAN等^[33]研究发现,可溶性蛋白质的保留度越高,包装的保鲜效果越好。本研究中,贮运2d,对照组和纳米组中可溶性蛋白含量分别为1.40 mg/g、1.76 mg/g,原因可能是泡沫箱内环境温度处于较低水平,香菇的生理代谢缓慢,可溶性蛋白质的损耗相对较低。贮运5d,对照组和纳米组可溶性蛋白质含量分别为0.98 mg/g和1.25 mg/g,较初始值下降了46.80%、32.03%,表明纳米材料能较好维持香菇的可溶性蛋白含量,这可能是因为纳米包装材料能调节包装内部的气体组成,降低香菇的呼吸速率,减缓香菇相关的代谢活动,延缓可溶性蛋白质消耗,这与方东路^[34]利用纳

米 Ag、纳米 TiO₂、纳米 SiO₂ 制备的纳米包装材料在金针菇的应用上具有相似效果。

香菇采后的代谢活动只能依靠自身的营养物质维持, 还原糖作为呼吸作用的基质^[19], 随着贮运时间的延长, 香菇还原糖含量持续下降。两组还原糖的变化规律如图 8(b), 贮运前期(0~2 d), 还原糖下降较快, 这可能是因为贮运前期包装内香菇呼吸代谢较强, 需要消耗大量还原糖以维持香菇旺盛的生理活动^[35]。贮运 5 d, 纳米组还原糖含量由 1.48 mg/g 降至 0.77 mg/g, 显著高于对照组($P<0.05$)。由此可见, 在贮运期间, 纳米包装材料能够减少还原糖的消耗, 延缓香菇的贮运品质下降。

抗坏血酸能保护机体免受内源性氧自由基的损伤。如图 8(c)所示, 随着贮运时间的延长, 抗坏血酸含量整体呈现下降的趋势, 除贮运 1 d 外, 纳米保鲜袋处理能显著抑制其下降速率($P<0.05$), 这一结果与赵哲坤等^[36]研究鲜切香菇贮藏期间抗坏血酸的变化趋势类似。贮运 5 d, 对照组和纳米组的抗坏血酸保留率分别为 31.55%和 39.21%。与对照组相比, 纳米组能显著有效抑制抗坏血酸的下降($P<0.05$), 增强对菇体的保护作用。NI 等^[37]研究表明, 新型乙烯保鲜包装能有效

减缓香菇抗坏血酸的降低, 与本研究具有相似效果。由此可见, 纳米保鲜袋能够延缓香菇中抗坏血酸的消耗速度。

2.8 香菇总酚和类黄酮的变化

酚类物质是香菇中天然的抗氧化成分, 在贮藏过程中, 酚类物质的积累会使香菇的酶促褐变受到抑制, 严重影响香菇的感官品质和商品价值^[20]。香菇贮运期间总酚含量变化如图 9(a)所示, 香菇总酚含量均呈下降趋势, 纳米组数据始终高于对照组。贮运第 1~3 d, 对照组总酚含量与纳米组差异显著($P<0.05$); 贮运 5 d, 对照组和纳米组总酚含量分别为 13.26 mg/100 g 和 16.51 mg/100 g, 与 0 d 相比, 降低了 52.68%和 41.09%, 此结果与 WANG 等^[38]通过高 O₂/CO₂ 处理鲜切双孢蘑菇的研究结果相反, 这可能是因为本研究使用的纳米包装材料具有高阻隔的效果(纳米保鲜袋 O₂ 透过率和 CO₂ 透过率分别为 3312.3 cm³/m²·24 h·0.1MPa 和 111235.5 cm³/m²·24 h·0.1MPa), 随着香菇呼吸作用不断产生 CO₂, 包装内部处于高 CO₂ 低 O₂ 环境, 抑制了总酚含量的降低^[39]。对照组总酚含量始终低于纳米组, 由此可见, 纳米包装材料能较好地保持总酚含量, 防止酚类物质的转化。

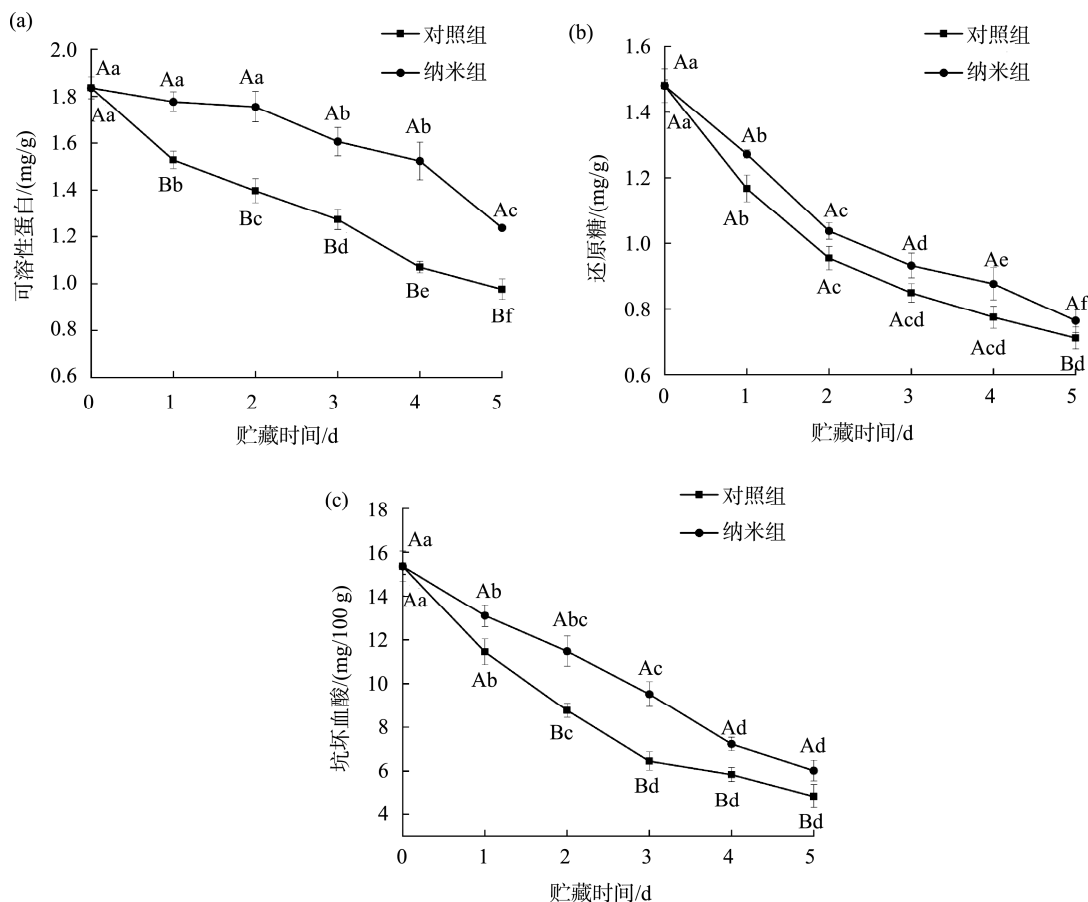


图 8 不同包装对香菇模拟电商物流环境下可溶性蛋白(a)、还原糖(b)、抗坏血酸(c)的影响

Fig.8 Effects of different packaging on the soluble protein (a), reducing sugar (b), and ascorbic acid (c) of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

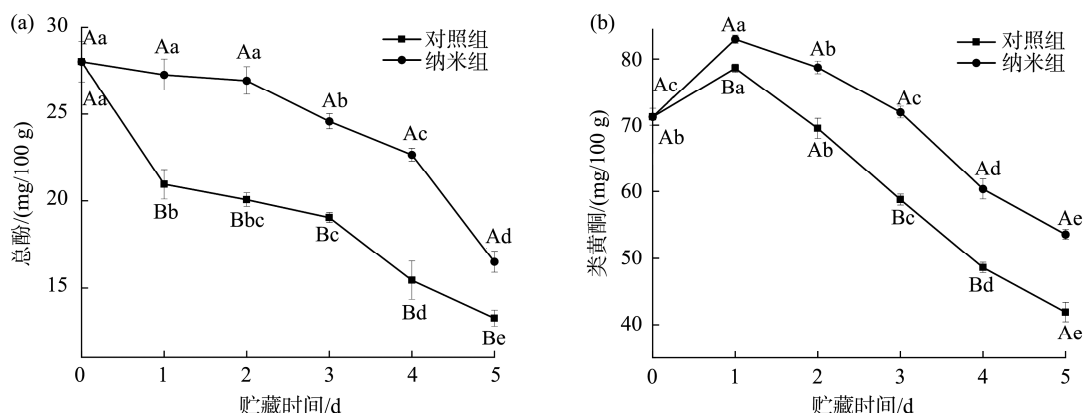


图9 不同包装对香菇模拟电商物流环境下香菇总酚(a)、类黄酮(b)的影响

Fig.9 Effects of different packaging on the total phenols (a) and flavonoids (b) of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment

类黄酮属于次生代谢产物,具有抗氧化作用,与子实体品质、风味、衰老等密切相关^[21]。由图9(b)可知,香菇的类黄酮含量总体呈下降趋势,与对照组相比,纳米组能显著维持较高的类黄酮含量($P<0.05$)。贮运1d时,对照组和实验组的类黄酮含量达到峰值,分别为78.61 mg/100 g、82.97 mg/100 g;贮运2d,两组类黄酮含量分别下降至69.50 mg/g、78.73 mg/g,这与SUBRAHMANYAM等^[40]研究包装内冷等离子体处理对双孢蘑菇黄酮的影响结果类似;贮运5d,对照组和实验组的类黄酮含量分别为41.88 mg/100 g和53.61 mg/100 g。与对照组相比,除贮运第2d和第5d外,纳米组能显著抑制香菇类黄酮含量的下降($P<0.05$),可能是由于纳米包装材料能有效减少香菇表皮的脂膜损伤,缓解酚类氧化。

3 结论

纳米保鲜袋能较好维持电商物流贮运环境下新鲜香菇的贮运品质。其中,纳米组整体上可以显著降低香菇的失重率($P<0.05$),有效维持香菇的硬度,延缓香菇褐变,减少可溶性固形物和相对电导率的下降,抑制呼吸强度增加。同时,纳米组还可显著提高营养品质含量($P<0.05$),减少可溶性蛋白、还原糖及抗坏血酸的损失,维持总酚和类黄酮含量。与PE保鲜袋相比,纳米保鲜袋处理更能维持香菇在电商物流过程中(2~5d)的营养品质。综上所述,纳米保鲜袋包装可有效维持香菇的贮运品质,使香菇在模拟电商物流环境下具有较高的商品价值,对提升新鲜香菇的市场竞争力具有重要意义。

参考文献

[1] SPIM VRS, CASTANHO MCRN, PISTILA HMA, et al. *Lentinula edodes* mushroom as an ingredient to enhance the nutritional and functional properties of cereal bars [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58: 1349–1357.

[2] 中国食用菌协会. 2021年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. *中国食用菌*, 2023, 42(1): 118–127.
China Edible Fungi Association. Analysis of the results of the national edible fungi statistical survey in 2021 [J]. *Edible Fungi China*, 2023, 42(1): 118–127.

[3] 杨文建, 王柳清, 胡秋辉. 我国食用菌加工新技术与产品创新发展现状[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(3): 13–18.
YANG WJ, WANG LQ, HU QH. Development situation on processing technology and product innovation of edible mushroom in China [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 37(3): 13–18.

[4] XIA RR, HOU ZS, XU HR, et al. Emerging technologies for preservation and quality evaluation of postharvest edible mushrooms: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023. DOI: 10.1080/10408398.2023.2200482

[5] ZENNYO Y. Strategic contracting and hybrid use of agency and wholesale contracts in E-commerce platforms [J]. *Eur J Oper Res*, 2020, 281(1): 231–239.

[6] CHANG HH, MEYERHOEFER CD. COVID-19 and the demand for online food shopping services: Empirical evidence from Taiwan [J]. *Am J Agric Econ*, 2021, 103(2): 448–465.

[7] 叶雅露. 枇杷果实物流保鲜技术商品性及经济效益的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
YE YL. The evaluation of loquat logistics technology's economic benefit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[8] YU WC, LI SH, ZHENG BW, et al. Transcriptome analysis reveals the potential mechanism of polyethylene packing delaying lignification of *Pleurotus eryngii* [J]. *Food Chem(Oxf)*, 2022, 5: 100117.

[9] XU FF, LIU YF, SHAN XF, et al. Evaluation of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment combined with nano-packaging on quality of *Pleurotus eryngii* [J]. *J Food Sci Technol*, 2018, 55(11): 4424–4431.

[10] ZHAO YX, YUN JM, GUO GX, et al. Regulation of polyethylene nano-packaging on postharvest stipe elongation of *Flammulina velutipes* [J].

- Agron, 2022, 12(10): 2362.
- [11] ZHU B, LIU Y, BRENNAN M, *et al.* Application of antimicrobial nanocomposite film packaging on the postharvest quality and specific spoilage organisms of mushrooms (*Russula virescens*) [J]. Food Control, 2024, 155: 110056.
- [12] YE S, CHEN MB, LIU YN, *et al.* Effects of nanocomposite packaging on postharvest quality of mushrooms (*Stropharia rugosoannulata*) from the perspective of water migration and microstructure changes [J]. J Food Saf, 2023. DOI: 10.1111/jfs.13050
- [13] 史德芳, 高虹, 程薇, 等. 纳米复合保鲜膜、其制备方法及其应用: 中国, CN108794789B[P]. 2021-03-09.
SHI DF, GAO H, CHENG W, *et al.* Nano-composite preservative film, its preparation method and application: China, CN108794789B [P]. 2021-03-09.
- [14] 叶爽, 陈聰, 高虹, 等. γ 射线辐照对香菇采收贮藏过程中水分特性及理化指标的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 91–97.
YE S, CHEN C, GAO H, *et al.* Effect of gamma irradiation on water properties and physicochemical indexes of *Lentinus edodes* during postharvest storage [J]. Food Sci, 2021, 42(17): 91–97.
- [15] WANG T, YUN J M, ZHANG Y, *et al.* Effects of ozone fumigation combined with nano-film packaging on the postharvest storage quality and antioxidant capacity of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2021, 176: 111501.
- [16] 姜宏志, 齐玲, 么宏伟, 等. 一种榆耳天然复合防腐剂应用于香菇保鲜的研究[J]. 中国林副特产, 2015, (5): 25–28.
JIANG HZ, QI L, YAO HW, *et al.* Study on the application of a natural compound preservative of elm ear to the preservation of shiitake mushroom [J]. Forest By-Prod Spec China, 2015, (5): 25–28.
- [17] 李艳杰, 高衍红, 王鹏, 等. 香菇热风干燥工艺优化及其对主要营养物质和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 209–214.
LI YJ, GAO YH, WANG P, *et al.* Optimization of hot air drying of shiitake mushrooms and its effect on main nutrient compounds and antioxidant activity [J]. Food Sci, 2017, 38(6): 209–214.
- [18] JIN X, YANG R, GUO L, *et al.* iTRAQ analysis of low-phytate mung bean sprouts treated with sodium citrate, sodium acetate and sodium tartrate [J]. Food Chem, 2017, 218: 285–293.
- [19] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruit and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [20] CHEN TT, ZHANG YY, SHANG YF, *et al.* NBD-BPEA regulates Zn²⁺- or Cu²⁺-induced A β ₄₀ aggregation and cytotoxicity [J]. Food Chem Toxicol, 2018: 119: 260–267.
- [21] 翟梦杰, 杜敏如, 林晖, 等. 不同包装方式对农贸市场模式销售鲜香菇品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 235–242.
- ZHAI MJ, DU MR, LIN H, *et al.* Effects of different packaging methods on the quality of fresh shitake mushrooms sold in farmers' markets [J]. Mod Food Sci Technol, 2023, 39(2): 235–242.
- [22] PAUDEL E, BOOM RM, VAN HE, *et al.* Effects of cellular structure and cell wall components on water holding capacity of mushrooms [J]. J Food Eng, 2016, 187: 106–113.
- [23] FANG DL, YANG WJ, KIMATU MB, *et al.* Effect of nanocomposite packaging on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of mushrooms (*Flammulina velutipes*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2016, 119: 49–57.
- [24] NI XY, YU JH, SHAO P, *et al.* Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with using innovative ethylene manipulating active packaging paper [J]. Food Chem, 2021, 345: 128757.
- [25] JIANG TJ, FENG LF, LI JR. Changes in microbial and postharvest quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) treated with chitosan–glucose complex coating under cold storage [J]. Food Chem, 2012, 131(3): 780–786.
- [26] MAHAJAN PV, OLIVERIRA FAR, MONTANEZ JC, *et al.* Development of user-friendly software for design of modified atmosphere packaging for fresh and fresh-cut produce [J]. Innov Food Sci Emerg, 2006, 8(1): 84–92.
- [27] LI Y, DING S, KITAZAWA H, *et al.* Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling [J]. Food Packag Shelf, 2022, 32: 100865.
- [28] 肖徐, 何晓梅, 张懿苑, 等. 泡沫箱包装抑制低温贮藏黄瓜冷害机理研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 196–203.
XIAO X, HE XM, ZHANG SY, *et al.* Study on the mechanism of inhibiting chilling injury of cucumber during low temperature storage by foam box packaging [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(20): 196–203.
- [29] XIA RR, ZHAO XM, XIN G, *et al.* Energy status regulated umami compound metabolism in harvested shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with spores triggered to release [J]. Food Sci Hum Well, 2023, 12(1): 303–311.
- [30] LIU J, LIU S, ZHANG X, *et al.* Effect of gallic acid grafted chitosan film packaging on the postharvest quality of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2019, 147: 39–47.
- [31] CAI M, ZHONG H, MA Q, *et al.* Physicochemical and microbial quality of *Agaricus bisporus* packaged in nano-SiO₂/TiO₂ loaded polyvinyl alcohol films [J]. Food Control, 2022. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108452
- [32] MA N, WANG C, PEI F, *et al.* Polyethylene-based packaging material loaded with nano-Ag/TiO₂ delays quality deterioration of *Agaricus bisporus* via membrane lipid metabolism regulation [J]. Postharvest Biol Technol, 2022, 131: 108452.
- [33] YAN XR, CHENG M, WANG YR, *et al.* Evaluation of film packaging containing mesoporous nanosilica and oregano essential oil for postharvest preservation of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biol

- Technol, 2023, 198: 112263.
- [34] 方东路. 纳米复合包装材料对金针菇的保鲜作用及其机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- FANG DL. Effect of nanocomposite packaging material on *Flammulina velutipes* preservation and its possible mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [35] 金晓燕, 赵鑫洪, 张龙, 等. 脉冲强光预处理联合控湿干燥提升香菇的贮藏品质[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 174–185.
- JIN XY, ZHAO XQ, ZHANG L, *et al.* Improving the storage quality of shiitake mushroom by intense pulsed light pretreatment combined with humidity-controlled drying [J]. Mod Food Sci Technol, 2023, 39(3): 174–185.
- [36] 赵哲坤, 吴林凤, 荣成博, 等. 延长鲜切香菇货架期的保鲜工艺[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3369–3382.
- ZHAO ZK, WU LF, RONG CB, *et al.* Fresh-keeping technique for prolonging shelf life of fresh-cut *Lentinula edodes* fruiting bodies [J]. Mycosystema, 2021, 40(12): 3369–3382.
- [37] NI XY, YU JH, SHAO P, *et al.* Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with using innovative ethylene manipulating active packaging paper [J]. Food Chem, 2021, 345: 128757.
- [38] WANG L, GUO YY, WANG XY, *et al.* Short-term O₂/CO₂ controlled atmosphere altered the water status and thus promoted phenolic biosynthesis during wound healing of fresh-cut white mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2022, 188: 111879.
- [39] 陈兆璇, 殷诚, 高晓煜, 等. 短期厌氧结合开孔调湿包装对香菇保鲜效果的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-9. [2023-12-25]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037713
- CHEN ZX, YIN C, GAO XY, *et al.* Effect of short-term anaerobic combination with open hole humidifying package on the fresh-keeping effect of mushroom [J]. Food Ferment Ind, 1-9. [2023-12-25]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037713
- [40] SUBRAHMANYAM K, GUL K, SEHRAWAT R, *et al.* Impact of in-package cold plasma treatment on the physicochemical properties and shelf life of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Biosci, 2023, 52: 102425.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介

刘娅妮, 硕士研究生, 主要研究方向为食(药)用菌功能食品开发研究。
E-mail: 273852473@qqom

史德芳, 博士, 研究员, 主要研究方向为食(药)用菌功能食品开发。
E-mail: shidefang@hbaas.com